

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.008

检修车轨道位置对钢箱梁涡振特性的影响

邢松^{1,2}, 蒋树勤³, 陈鹏³

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东省公路建设有限公司湾区特大桥养护技术中心, 广东 东莞 510120;
3. 广西欣港交通投资有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要: 为了研究检修车轨道位置变化对结构气动稳定性的影响, 以一座闭口钢箱梁断面的大跨径悬索桥为研究对象, 通过节段模型风洞试验得到不同检修车轨道位置下结构的涡振位移响应, 并采用计算流体力学方法进行典型工况下的断面周围流场模拟, 进一步探究了检修车轨道位置影响断面涡振特性的内部机理。结果表明: 检修车轨道位置对断面的竖向涡振和扭转涡振均有明显影响, 检修车轨道位于中部或者边缘时都会减弱断面的涡振稳定性, 尤其是当检修车轨道位于边缘时会诱发大幅扭转振动; 涡振主要由尾流涡脱引起, 检修车轨道位置的改变会使尾流涡脱的尺寸和位置发生变化, 从而进一步影响主梁断面的涡振稳定性; 当检修车轨道相对位置为 0.75 时, 尾流及检修车轨道附近旋涡微弱, 流场稳定性最优。

关键词: 涡振; 风洞试验; 检修车轨道; CFD

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)04-0056-05

Influence of maintenance track position on vortex vibration characteristics of steel box girder

XING Song^{1,2}, JIANG Shuqin³, CHEN Peng³

(1. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Bay Area Super Bridge Maintenance Technology Center, Guangdong Highway Construction Co., Ltd., Dongguan 510120, China;

3. Guangxi Xingang Transportation Investment Co., Ltd., Nanning 530022, China)

Abstract: In order to study the influence of position change of maintenance track on aerodynamic stability of structures, a long-span suspension bridge with closed steel box girder section is taken as the research object. The vortex vibration displacement response of the structure under different positions of maintenance tracks is obtained through the segmental model wind tunnel test. The computational fluid dynamics (CFD) method is used to simulate the flow field around the section under typical working conditions, and the internal mechanism of the influence of the maintenance track position on the vortex vibration characteristics of the section is further explored. The research results show that the location of the maintenance track has obvious influence on the vertical and torsional vortex vibration of the section. When the maintenance track is located at the middle or edge, the vortex vibration stability of the section will be deteriorated. Especially when the maintenance track is located at the edge, large amplitude torsional vibration will be induced. The numerical simulation results of the flow field show that the vortex vibration is mainly caused by the wake vortex shedding, and the change of the position of the maintenance track will change the size and position of the wake vortex shedding, thus further affecting the vortex vibration stability of the section. When the relative position of the track is 0.75, the vortex near the wake and repair track is weak and the flow field stability is optimal.

Key words: vortex vibration; wind tunnel test; maintenance track; CFD

塔科马大桥的风毁事件让人们认识到了大跨径桥梁抗风问题的重要性, 其断面气动外形所存在的问题也为后面的桥梁抗风设计提供了重要参考。闭口扁平钢箱梁因其出众的抗扭特性以及优越的抗风稳定性而得到广泛应用^[1]。随着桥梁跨径的不断增大, 结构刚度降低, 钢箱梁断面也会出现涡振、颤振等风致振动问

基金项目: 广西科技重点研发计划项目(桂科 AB23026125)

作者简介: 邢松(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁抗风研究。E-mail: songxing@chd.edu.cn

引用本文: 邢松, 蒋树勤, 陈鹏. 检修车轨道位置对钢箱梁涡振特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 56-60.

XING Song, JIANG Shuqin, CHEN Peng. Influence of maintenance track position on vortex vibration characteristics of steel box girder [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 56-60.

题^[2-4]。颤振造成的毁灭性破坏令人望而生畏,涡振作为一种限幅性振动也会严重影响行车安全,并进一步造成结构疲劳等问题^[5]。近年来西堠门大桥^[6]、虎门大桥等国内大跨径桥梁先后发现大幅风致振动,引起社会的广泛关注,也促进了桥梁抗风稳定性的更深入和精细化研究。

关于钢箱梁的气动稳定性已有大量研究^[7-9],随着桥梁抗风设计的不断精细化,白桦等^[10-12]研究发现,除了断面自身外形会对结构抗风稳定性产生影响外,栏杆以及检修车轨道等附属设施也是影响断面气动特性的重要因素,其中检修车轨道位置在多项研究中均被认为是影响断面气动稳定性的主要因素。刘志文等^[13]采用大比尺模型风洞试验与数值模拟相结合的方法研究了钢箱梁的涡振特性及其起振机理。曹丰产等^[14]通过节段模型风洞试验以及数值模拟方法研究了钢箱梁的气动稳定性以及附属构件对该桥涡振特性的影响,发现扁平钢箱梁断面在安装附属构件后产生了明显的涡激共振现象,且检修车轨道基座的位置是影响其涡振稳定性最主要的因素。高亮^[15]通过风洞试验研究了包括检修车轨道在内的多种附属构件对主梁静三分力的影响,发现随着检修车轨道位置向内侧移动,主梁的阻力系数减小,升力系数绝对值减小,扭矩系数整体减小。杨婷等^[16]的研究表明,检修车轨道是诱发结构出现涡激振动的主要原因,检修车轨道位置对气流的分离点有明显影响,这也是诱发结构涡激振动的内在机理。马存明等^[17]通过风洞试验研究了气动措施对分离式箱梁涡振特性的影响,发现分离式箱梁在单个箱体设置检修车轨道反而会使原截面的涡振稳定性变差。陈星宇^[18]研究发现,检修车轨道位置会明显影响断面的静三分力系数,且箱梁涡振最大振幅随着检修车轨道内移而减小,当检修车轨道处于斜腹板延长线与底板的夹角范围内时,箱梁涡振振幅基本稳定,不再随着轨道位置的内移而明显减小。

为了研究检修车轨道位置对钢箱梁涡振稳定性的影响,本文以一座主梁为钢箱梁的大跨径悬索桥为研究对象,通过节段模型风洞试验,对比分析检修车轨道不同位置下结构的涡振响应,并通过 CFD 方法模拟不同工况下的静态绕流,分析检修车轨道位置改变与断面周围流场特征之间的关系,研究检修车轨道影响结构涡振特性的内在机理。

1 风洞试验

1.1 试验设置

节段模型风洞试验在长安大学 CA-1 大气边界层风洞实验室进行,试验段长 15 m,横截面为 3 m×2.5 m,最高风速可达 53 m/s。大跨径悬索桥主梁为扁平钢箱梁,宽高比为 11 : 1。试验断面为该桥的成桥状态,在两侧有倒 L 形导流板,底部设有两道检修车轨道。节段模型缩尺比为 1 : 60,长 1.5 m,宽 0.55 m。成桥状态下悬挂于风洞内支架上的测振节段模型如图 1 所示,在模型前后设置细长铁丝从而限制其顺风向位移。在两侧设置 3 个激光位移计来采集模型的位移时程信号。节段模型参数见表 1,由表 1 可知,竖弯基频、扭转基频、等效质量、等效质量惯矩、竖弯阻尼比、扭转阻尼比的试验实测值和目标值间的相对误差分别为-0.11%、0.21%、0.22%、-0.41%、-3.33%、-3.33%。

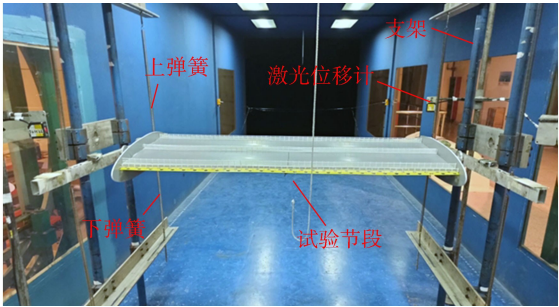


图 1 节段模型风洞试验布置

Fig. 1 Layout of section model in the wind tunnel

表 1 节段模型风洞试验参数

Table 1 Wind tunnel test parameters of section model

统计值	竖弯基频/Hz	扭转基频/Hz	等效质量/(kg/m)	等效质量惯矩/(kg·m ² /m)	竖弯阻尼比/%	扭转阻尼比/%
实桥值	0.1463	0.3024	29868	5095640	0.3	0.3
模型目标值	3.2995	6.8219	8.2968	0.3932	0.3	0.3
模型实测值	3.2959	6.8359	8.3152	0.3916	0.29	0.29

鉴于钢箱梁检修车轨道多数位于底板,因此本文仅针对该种情况开展研究。为了更好地拓展研究成果,定义检修车轨道位置无量纲参数为 $l' = l/b$, l 为检修车轨道到截面中心线的间距, b 为底板宽度的一半(图 2)。根据检修车轨道位置由内而外设置 4 种不同的工况,每种工况包括 0°和±3°共 3 种风攻角,流场均为均匀流场,涡振风速比均为 1 : 2.66,具体的工况设置见表 2。

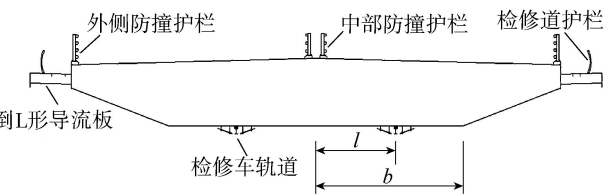


图2 检修车轨道位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of track position of maintenance vehicle

表2 风洞测振试验工况		
Table 2 Vibration test condition in wind tunnel		
工况编号	l/mm	l'
JD1	7 000	0.66
JD2	8 000	0.75
JD3	8 850	0.83
JD4	9 200	0.86

1.2 结果与分析

基于激光位移计采集的时程数据,得到不同工况下竖向和扭转振幅随风速的变化曲线。图3为4个工况在不同风攻角下的竖向响应,所有工况竖向涡振限制均为270 mm。由图3可知,所有工况下均未出现大幅竖向涡振现象,模型断面竖向涡振稳定性均能满足 JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》要求。工况 JD1 的竖弯涡振稳定性最差,在3种风攻角下均存在竖向涡振现象,且在 -3° 风攻角下最不利,在实桥风速20 m/s时竖向振幅达到11.529 mm。工况 JD4 在 0° 和 3° 风攻角下出现微小的竖向振动,工况 JD2 和 JD3 均有很好的竖向涡振稳定性。可见,当检修车轨道靠近底板中央位置或边缘位置时,均会导致结构的竖向涡振稳定性变差。

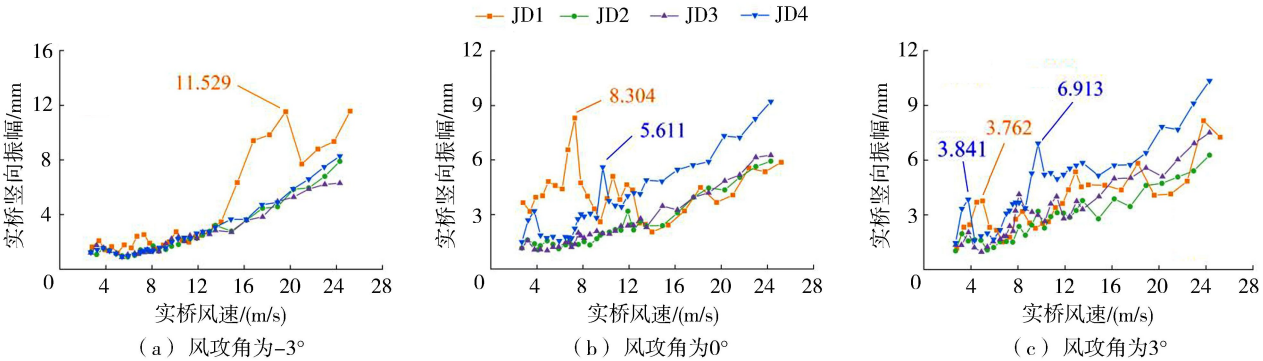


图3 竖向振幅

Fig.3 Vertical torsion amplitude

图4为4个工况在不同风攻角下的扭转响应,所有工况扭转涡振限制均为270 mm。由图4可知,工况 JD4 在各风攻角下均会出现大幅扭转振动现象,最大扭转振幅甚至达到 0.4° ,超过 JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》限值,说明当检修车轨道位于底板边缘时会明显降低结构的扭转涡振稳定性,这是在桥梁设计中需要避免的。除了工况 JD4 外,其余3个工况在各风攻角下均存在小幅扭转涡振现象,其中工况 JD1 最明显,并在 0° 风攻角下出现明显的双涡振锁定区间;工况 JD4 和 JD3 也存在双涡振区间现象,区间范围分别为实桥风速7 m/s附近(简称涡振区间1)和10 m/s附近(简称涡振区间2)。 0° 和 -3° 风攻角下

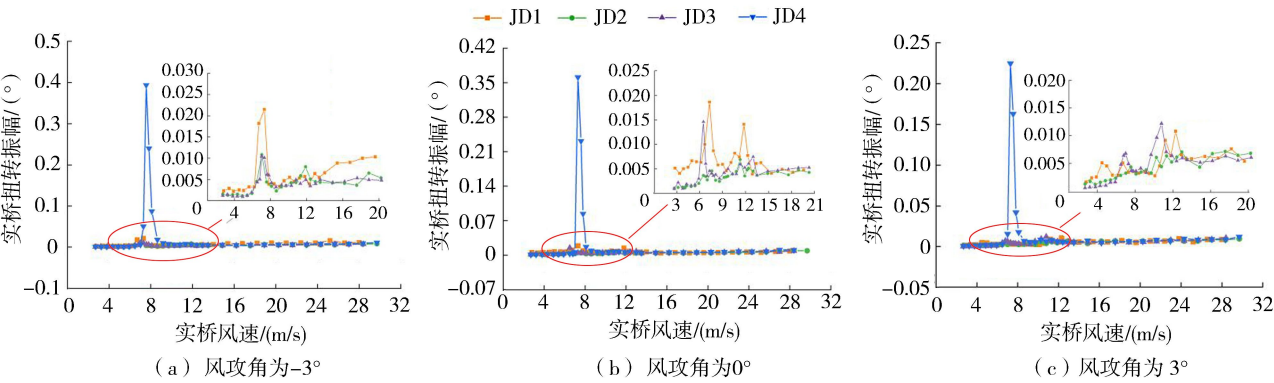


图4 扭转振幅

Fig.4 Torsion amplitude

主要为涡振区间 1 占主,而 3° 风攻角下主要为涡振区间 2 占主。扭转振幅的大小可以反映各涡振区间的能量占比,由图 4 可知检修车轨道位置的变化会对双涡振区间的能量占比产生影响,当其位于最外侧时所有风攻角均为涡振区间 1 占主,且极为突出。

将图 4 中各工况最大扭转振幅汇于图 5,可见随着检修车轨道由内侧向边缘移动,结构的扭转振幅最大值呈现先减小后增大的趋势,由此可以推断在底板中部和边缘之间存在扭转涡振稳定性最优位置。

2 流场数值模拟

计算流体力学方法现已成为流场研究的重要手段^[19-20]。通过试验可知工况 JD2 为最优工况,因此结合试验结果通过计算流体力学方法对最内侧工况(工况 JD1)、最外侧工况(工况 JD4)和最优工况(工况 JD2)进一步进行流场特性分析。图 6 为流域整体网格以及结构断面附近网格(图中 B 为模型宽度),网格由外而内分层逐渐加密,并在附属构件处再次加密,网格数量约 20 万。流域左侧为速度入口,右侧为压力出口,上下两侧为对称边界。采用的湍流模型为桥梁断面流场研究中广泛使用的 $SSTk-\omega$ 模型^[7,21]。采用 SIMPLE 算法进行流场瞬态计算,时间步长定为 0.001 s,并将残差设置为 10^{-5} 。

图 7 为最优工况 JD2 在周期内不同时间点的流线与涡量(图中 T 为周期, $nT+T/4$ 为流场稳定后 1/4 周期时刻)。对于工况 JD2,在迎风导流板和检修车轨道处存在再附的旋涡。尾流区旋涡主要位于倒 L 形导流板的上下两侧以及后侧,背风侧检修车轨道后侧仅有一个小涡,对整体气动稳定性影响很小。尾流涡在倒 L 形导流板末端很快消散,整个尾流区涡量图及流线图呈层状,气动稳定性好。

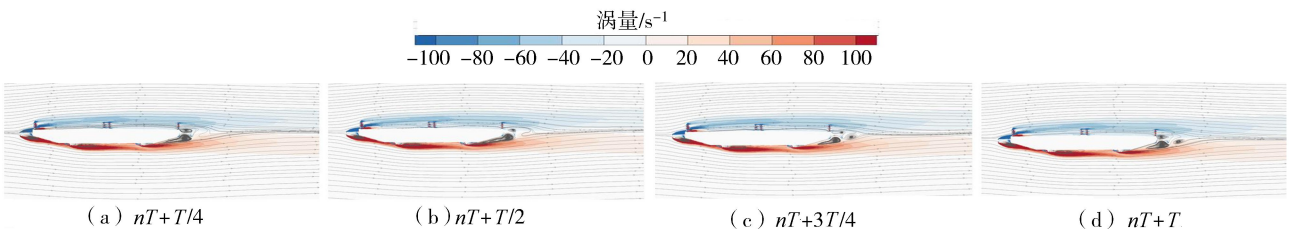


图 7 工况 JD2 流线与涡量
Fig. 7 Flow line and vorticity diagram under JD2

图 8 为工况 JD1 在周期内不同时间点的流线与涡量。工况 JD1 存在微弱的涡振现象,在迎风导流板和检修车轨道处存在再附的旋涡,但不同的是在桥面后侧出现再附的旋涡。由于检修车轨道与边缘距离变大,背风侧检修车轨道后侧旋涡也随之变大。尾流区旋涡也变得更加复杂,在倒 L 形导流板后侧开始出现旋涡交替脱落现象。

图 9 为工况 JD4 在周期内不同时间点的流线与涡量。工况 JD4 存在明显的涡振现象,与工况 JD1、JD2 不同的是背风侧检修车轨道后侧漩涡已经与倒 L 形导流板下侧漩涡合并为一个大涡,竖向尺寸由原本的 1/2 梁高发展至梁高大小,且尾流大涡中心位置从倒 L 形导流板正下方前移至主梁背风侧斜腹板处。尾流区出现明显的卡门涡街,致使断面发生大幅振动。

3 结 论

a. 对于竖向振动,检修车轨道位于中部时断面的涡振稳定性最差,且随检修车轨道位置外移竖向涡振

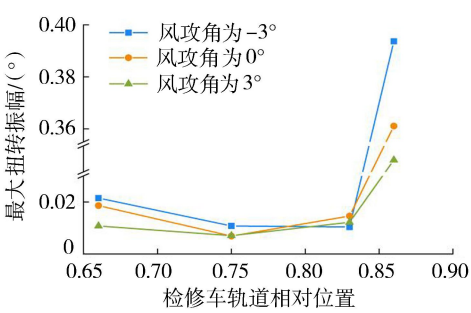


图 5 扭转振幅最大值
Fig. 5 Maximum of torsional amplitudes

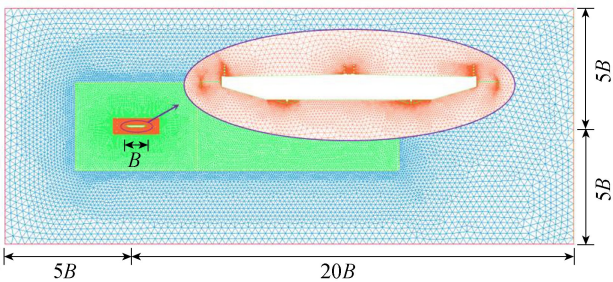


图 6 模型流场网格
Fig. 6 Mesh diagram of model flow field

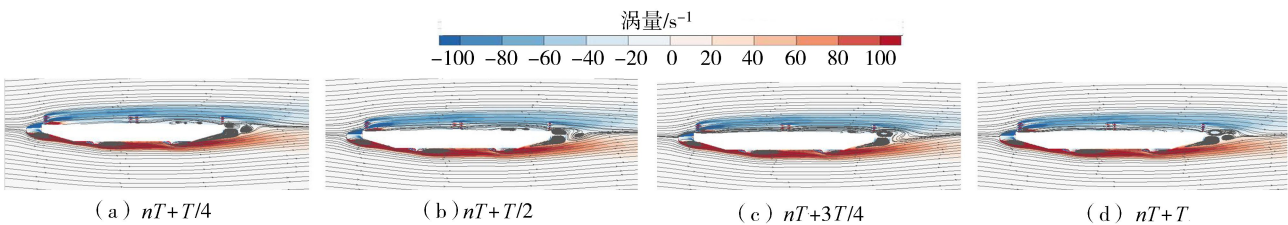


图 8 工况 JD1 流线与涡量

Fig. 8 Flow line and vorticity diagram under JD1

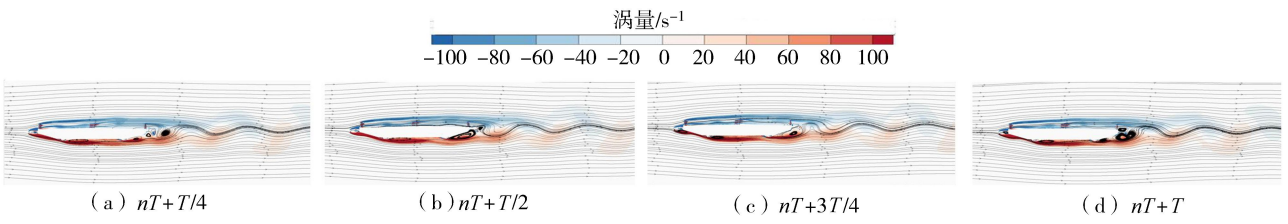


图 9 工况 JD4 流线与涡量

Fig. 9 Flow line and vorticity diagram under JD4

振幅呈现先减小后增大趋势。

b. 对于扭转振动,扭转振幅同样会随着检修车轨道位置外移而呈现先减小后增大趋势。而最不利状态出现在检修车轨道位于底板最边缘时,该工况不同攻角下均存在大幅振动。

c. 检修车轨道位置的改变会对双涡振锁定区间的能量占比产生显著影响。

d. 通过流场分析发现扭转涡振主要是由尾流区旋涡引起的。检修车轨道位于 $l' = 0.66$ 或 0.86 位置时尾流会产生大尺度旋涡。而当 $l' = 0.75$ 时,尾流旋涡小,位置分布在倒 L 形导流板附近,检修车轨道附近旋涡微弱,流场稳定性好。

参考文献:

[1] 赵林,李珂,王昌将,等. 大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述[J]. 中国公路学报,2019,32(10):34-48. (ZHAO Lin,LI Ke,WANG Changjiang,et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(10):34-48. (in Chinese))

[2] 李永志,董世杰,王佳豪,等. 廊架对人行刚构桥涡振性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):87-96. (LI Yongzhi,DONG Shijie,WANG Jiahao,et al. Effect of corridor frame on vortex-induced vibration performance of pedestrian rigid frame bridge[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(5):87-96. (in Chinese))

[3] WANG Qi,LIAO Haili,LI Mingshui. Influence of aerodynamic configuration of a streamline box girder on bridge flutter and vortex-induced vibration[J]. Journal of Modern Transportation,2011,19(4):261-267.

[4] LARSEN A. Aerodynamic aspects of the final design of the 1624 m suspension bridge across the great belt[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1993,48(2/3):261-285.

[5] 华旭刚,黄智文,陈政清. 大跨度悬索桥的多阶模态竖向涡振与控制[J]. 中国公路学报,2019,32(10):115-124. (HUA Xugang,HUANG Zhiwen,CHEN Zhengqing. Multi-mode vertical vortex-induced vibration of suspension bridges and control strategy[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(10):115-124. (in Chinese))

[6] 李言哲. 基于健康监测的西堠门大桥动力特性与涡振性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2020.

[7] 李加武,潘辉,高广中,等. 扁平钢箱梁颤振气动措施试验研究[J]. 公路交通科技,2021,38(1):69-78. (LI Jiawu,PAN Hui,GAO Guangzhong,et al. Experimental study on aerodynamic measures for flutter of flat steel box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(1):69-78. (in Chinese))

[8] 鲜荣,廖海黎. 封闭式扁平钢箱梁颤振稳定性气动优化措施风洞试验研究[J]. 世界桥梁,2008,36(3):44-47. (XIAN Rong,LIAO Haili. Wind tunnel test study of aerodynamic optimization measures for flutter stability of closed flat steel box girder [J]. World Bridges,2008,36(3):44-47. (in Chinese))

[9] 洪成晶. 大跨度桥梁流线型钢箱梁颤振临界风速及颤振导数数值计算方法[D]. 成都:西南交通大学,2019.

ZHOU Wenting,ZHANG Wanshun,et al. Construction and application of cloud traceability system for sudden water pollution in river basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):176-181. (in Chinese))

[19] VAREKAR V,KARMAKAR S,JHA R,et al. Design of sampling locations for river water quality monitoring considering seasonal variation of point and diffuse pollution loads[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2015,187(16):376. 1-376. 26.

[20] 庄巍,李维新,周静,等. 长江下游水源地突发性水污染事故预警应急系统研究[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(1):34-40. (ZHUANG Wei,LI Weixin,ZHOU Jing,et al. Early warning system for sudden water pollution incidents in water source areas in lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2010,26(1):34-40. (in Chinese))

[21] LEE B H,DEININGER R A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system[J]. Journal of Environmental Engineering,1992,118(1):4-16.

[22] OSTFELD A,SALOMONS E. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2004,130(5):377-385.

[23] STROBL R O,ROBILLARD P D,SHANNON R D,et al. A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points:Part I[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2006,112:137-158.

[24] LIU Y,ZHENG B H,WANG M,et al. Optimization of sampling frequency for routine river water quality monitoring[J]. Science China Chemistry,2014,57:772-778.

[25] DING H,XU Z,CHEN Y. Modelling of accidental water pollution incidents at Chengtong Reach of Yangtze River[C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, USA:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019:637-642.

[26] SIM H P,BURN D H,TOLSON B A. Probabilistic design of a riverine early warning source water monitoring system[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2009,36(6):1095-1106.

(收稿日期:2023-02-28 编辑:熊水斌)

(上接第 60 页)

[10] 白桦. 影响桥梁及建筑结构风洞试验结果若干因素研究[D]. 西安:长安大学,2012.

[11] 符健. 大跨度悬索桥颤振特性风洞试验研究与数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2016.

[12] 党嘉敏. 栏杆展向布置形式对直腹板钢箱梁涡激振动的影响[D]. 西安:长安大学,2021.

[13] 刘志文,江智俊,黎晓刚,等. 流线型钢箱梁涡激振动机理与气动控制措施[J]. 中国公路学报,2022,35(11):133-146. (LIU Zhiwen,JIANG Zhijun,LI Xiaogang,et al. Study on mechanism and aerodynamic control measures for vortex-induced vibration of a streamlined-box steel girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(11):133-140. (in Chinese))

[14] 曹丰产,葛耀君,吴腾. 钢箱梁斜拉桥涡激共振及气动控制措施研究[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集:中册. 大连:大连理工大学出版社,2007:668-673.

[15] 高亮. 桥梁断面三分力系数试验研究[D]. 西安:长安大学,2010.

[16] 杨婷,周志勇. 中央开槽箱梁涡激共振特性及抑振措施机理研究[J]. 振动与冲击,2015,34(10):76-83. (YANG Ting,ZHOU Zhiyong. Vortex-induced resonance characteristics and anti-vibration measures' mechanism of central-slotted box girders [J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(10):76-83. (in Chinese))

[17] 马存明,王俊鑫,罗楠,等. 宽幅分体箱梁涡振性能及其抑振措施[J]. 西南交通大学学报,2019,54(4):724-730. (MA Cunming,WANG Junxin,LUO Nan,et al. Vortex-induced vibration performance and control measures of wide twin-box girder [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2019,54(4):724-730. (in Chinese))

[18] 陈星宇. 大攻角来流作用下流线型钢箱梁断面涡激振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[19] 赵峰,刘卫东,阚阚,等. 基于 CFD 的尾水冷却器布置方案优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):138-143. (ZHAO Feng,LIU Weidong,KAN Kan,et al. CFD-based optimization of layout scheme of tail water cooler[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(6):138-143. (in Chinese))

[20] 张芝永,谢咏哲,陈红,等. 涌潮 CFD 数值模拟若干问题探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):58-65. (ZHANG Zhiyong,XIE Yongzhe,CHEN Hong,et al. Discussion on some problems of numerical simulation of tide using CFD technology[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):58-65. (in Chinese))

[21] 李加武,徐敏建,王子健,等. 风嘴几何参数对双边箱式 II 型梁涡振性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):74-83. (LI Jiawu,XU Minjian,WANG Zijian,et al. Effect of geometric parameters of wind fairing on vortex-induced vibration performance of two-side box type II-shaped girder[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(5):74-83. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-11 编辑:刘晓艳)